

# 考虑 CFG 复合地基对土体侧向加固作用的 基坑支护结构优化

李连祥<sup>1</sup>, 张海平<sup>2</sup>, 徐帮树<sup>1</sup>, 王宇<sup>3</sup>

(1. 山东大学基坑与深基础工程技术研究中心, 山东 济南 250061; 2. 济南西城投资开发集团有限公司, 山东 济南 250300;  
3. 济南市勘察测绘研究院, 山东 济南 250013)

**摘要:** CFG 复合地基竖向加固作用已得到深入研究和广泛运用, 但在国内外相关领域未见 CFG 复合地基的侧向变形和侧压力研究成果。现行国家和行业相关规范、规程缺乏对开挖条件下 CFG 复合地基侧向基坑支护结构设计的规定和指导。笔者从 CFG 复合地基竖向工作机理出发, 判断 CFG 复合地基侧向加固作用不可小视, 凭借数值模拟规律和跟踪勘察数据, 结合基坑监测反馈, 对济南省会文化艺术中心(大剧院)舞台台仓锚拉双排桩支护结构进行了优化, 从三排锚索减少到一排。尽管如此, 施工变形监测结果只是相关计算的 1/3, 这说明: CFG 复合地基侧向加固作用可以有效降低支护结构变形, 应值得行业关注和研究。

**关键词:** CFG 复合地基; 侧向加固; 台仓支护结构; 优化

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0500-07

**作者简介:** 李连祥(1966-), 男, 河北唐山人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事基坑工程理论和技术研究。E-mail: sjkdoctor@gmail.com。

## Optimization of excavation supporting structure considering lateral reinforcement effect of CFG composite foundation on soils

LI Lian-xiang<sup>1</sup>, ZHANG Hai-ping<sup>2</sup>, XU Bang-shu<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>3</sup>

(1. Foundation Pit and Deep Foundation Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Jinan West Investment and Development Group Co., Ltd., Jinan 250300, China; 3. Jinan Institute of Investigation and Surveying, Jinan 250013, China)

**Abstract:** The vertical reinforcement effect of CFG composite foundation has been thoroughly studied and widely used. The results of lateral deformation and lateral pressure of CFG composite foundation are scarce in the domestic or foreign relevant areas. The existing national and industrial norms are short of the regulation and guidance of excavation supporting structure design for CFG composite foundation under excavation conditions. The authors think that the lateral reinforcement effect of CFG composite foundation can not be ignored according to its vertical working mechanism. Based on the rules from numerical simulation and tracking survey data, combined with the monitoring feedback to excavations, the supporting structure of combining the double-row piles with the anchor cables for stage-bin of Jinan Provincial Capital Cultural Arts Center (Theatre) is optimized, which makes three rows of anchor cables to a row. Nevertheless, the construction monitoring results of the lateral deformation is only one-third of the relevant calculation, indicating that the lateral reinforcement effect of CFG composite foundation can reduce the deformation of supporting structure effectively, and it is worth of the industrial attention and study.

**Key words:** CFG composite foundation; lateral reinforcement; stage-bin supporting structure; optimization

## 1 优化背景

### 1.1 台仓概况

建设中的济南省会文化艺术中心(大剧院)是2013年10月第10届中国文化艺术节主会场。大剧院基础采用了 CFG 复合地基及筏板基础, 其舞台台仓处于 CFG 复合地基包围之中, 如图 1。

台仓顶部高低错落, 如图 2 所示, 呈不规则“T”型, 平面尺寸为 64 m×42 m。基坑四周侧壁分别高为 12.9, 10.55, 7.6 m。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41172267); 济南市科技计划(201201145)

收稿日期: 2012-08-24

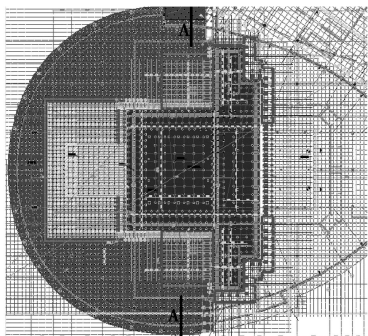


图 1 台仓平面位置图  
Fig. 1 Plan of stage-bin

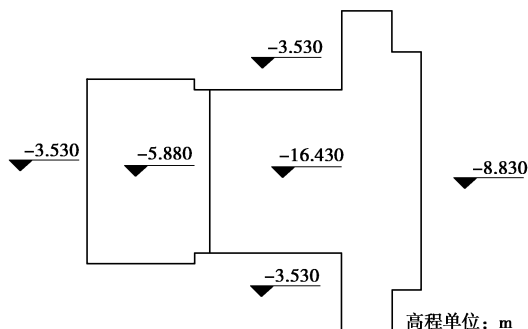


图 2 台仓顶底标高图  
Fig. 2 Elevation of top and bottom of stage-bin

1.2 支护结构设计方案

(1) 支护结构选型

根据工程安排,台仓开挖前周边 CFG 桩已经施工完毕,台仓支护结构设计需要适应复合地基包围的环境要求。两个难点:一是结构选型——台仓周边布满 CFG 群桩,将来形成复合地基,放坡开挖已不可能,必须选择直立支护结构。直立开挖基础上,主体设计单位要求 CFG 基桩侧向位移小于 0.15%。就济南地区经验<sup>[1]</sup>,首选桩锚支护结构,保持足够刚度,控制台仓侧壁支护结构位移;二是结构计算分析,由于台仓开挖边缘以外土体已被 CFG 群桩置换,按国家及地方现有相关规范和既有理论,无法计算包含 CFG 群桩的复合地基支护结构的侧压力,如图 3。

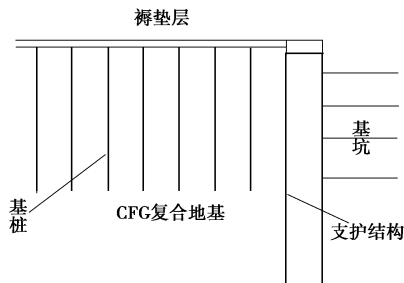


图 3 双排桩与 CFG 复合地基关系示意图  
Fig. 3 Relationship between double-row pile and CFG composite foundation

(2) 设计方案

a) 支护桩与 CFG 复合地基桩“一桩两用”

台仓基坑开挖有 3 个深度,分别是 12.9, 10.55,

7.6 m,周边 CFG 群桩布置有 3 种间距分别为 1.2, 1.6, 2.4 m,若采用桩锚支护,按相关经验支护桩桩径结构 800~1100 mm,锚索间距易与 CFG 桩布置矛盾。经与主体设计人员共同研究,决定将支护结构融入 CFG 地复合地基中,外排 CFG 桩既作支护桩又为地基桩。考虑 CFG 桩只有 400 mm 直径,结合相关经验,为增加支护结构刚度将支护桩调为 600 mm。即使如此,也难以适应开挖深度要求,因此,将台仓边缘第二排 CFG 桩调整为支护桩,桩径调为 600 mm,形成双排桩<sup>[4]</sup>,如图 3, 4。

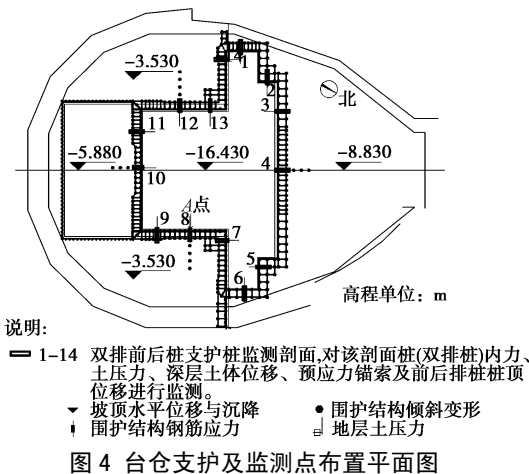


图 4 台仓支护及监测点布置平面图  
Fig. 4 Retaining and monitoring plan of stage-bin

b) 试算分析

由于直径 400 mm CFG 桩被调整为 600 mm 直径支护桩,且双排桩设置横纵冠梁,考虑支护桩和冠梁刚度增强,支护桩冠梁上褥垫层 300 mm,其他为 150 mm(见图 3)。因此,台仓侧壁深度分别为 12.75, 10.4, 7.45 m。应用理正 6.0 基坑软件双排桩支护单元计算。由于国内相关规范<sup>[2-3]</sup>和理论不能提供 CFG 群桩对土体的加固作用,计算分析中将 CFG 复合地基视为原状土,直接应用岩土勘察报告中提供的土层参数,如表 1。(黏聚力、摩擦角的标准值,为原状土试样的直剪试验结果)。

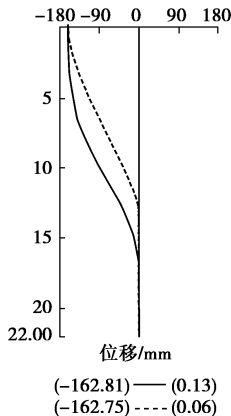


图 5 原状土参数悬臂双排桩计算  
Fig. 5 Calculation of cantilever double-row with parameters of undisturbed soils



表 1 土体物理力学参数表  
Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

序号	层号	土类名称	层厚 /m	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	压缩模量 $E_{s1-2}$ /MPa	变形模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
1	②	粉质黏土	2.39	19.8	6.0	18.0	0.28	19.20	18.80
2	③	粉土	0.94	19.9	9.2	27.6	0.30	24.00	26.90
3	④	粉质黏土	1.22	20.1	6.4	19.2	0.28	19.90	17.60
4	④1	粗砂	1.12	19.5	15.0	45.0	0.30	0.00	35.00
5	⑤	粉质黏土	13.28	19.5	6.5	19.5	0.28	22.70	19.90
6	⑤1	中砂	2.14	20.0	20.0	60.0	0.30	0.00	35.00
7	⑥	粉质黏土	2.52	19.3	7.2	21.6	0.28	25.0	20.00
8	⑥1	黏土	1.36	19.7	12.2	36.6	0.28	35.0	18.00

根据原状土条件下双排悬臂桩计算结果，如图 5 所示，水平位移达到 1.3%H（H 开挖深度），无法满足主体结构对 CFG 基桩变形要求，需要采取措施控制水平变形。

c) 设计方案

采取增设预应力锚索措施，增强悬臂支护桩控制基坑侧壁水平变形的能力。考虑台仓周边标高和平面状况，将台仓侧壁划分为 3 个支护单元，根据侧壁深度在不同标高处设置预应力锚索。锚索在台仓侧壁立面形成“环箍”。方案及计算结果见表 2，1-1 支护单元剖面做法见图 6，支护单元 1-1 计算包络图见图 7。

考虑台仓周围大面积 CFG 群桩，一方面，基于复合地基工作机理<sup>[5]</sup>，判断大量 CFG 基桩对原状土的侧向加固作用不可忽视；另一方面不同间距较为密集的 CFG 基桩存在，使大量预应力锚索施工困难，锚索成孔倾角、偏斜都可能与 CFG 桩基冲突。因此减少预应力锚索数量将会一定程度上解放工期。

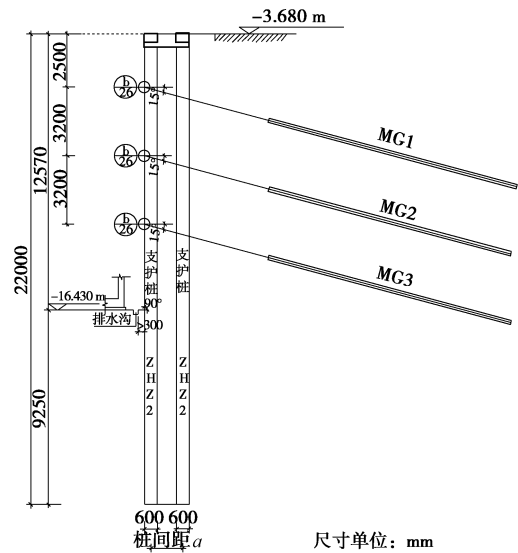


图 6 1-1 支护单元剖面图  
Fig. 6 Profile of 1-1 retaining unit

2 设计优化

2.1 优化原因

该项目是 2013 年第十届中国文化艺术节主会场，由于项目前期地基基础选型、施工技术以及地层适应性等问题，地下工程节点一直延后，工期压力巨大。

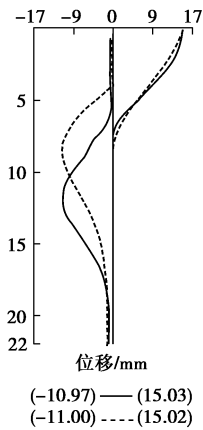


图 7 1-1 支护单元位移计算图  
Fig. 7 Displacement calculation of 1-1 retaining unit  
2.2 优化的有利因素

(1) 台仓基坑处于大面积 CFG 复合地基之内，台仓基坑周边形成土与 CFG 桩的复合体，双排支护桩主动土压力减弱；台仓底部为钢筋混凝土抗拔桩，坑底以下土层被灌注桩加固，支护结构被动土压力加强。

(2) 台仓施工时，周边配套工程大量降水，地下水水位控制在-9.5 m 以下，其上土层因降水岩土参数得到改善<sup>[6]</sup>。

(3) 台仓基坑顶标高不一致，开挖高度不一，且台仓基坑面积规模较小，拐角较多，不同方向侧壁相互支撑，空间作用明显。

综合考虑，并经专家组专门论证，台仓支护结构存在优化空间。

表 2 设计方案  
Table 2 Design schemes

支护单元	开挖深度/m	桩长/m	设置锚索/排	标高/m			最大水平变形 S/mm	$\frac{S}{H}/\%$
				位置 1	位置 2	位置 3		
1-1	12.75	22	3	-6.18	-9.38	12.58	7.11	0.12
2-2	10.40	18	2	—	-9.38	12.58	11.82	0.11
3-3	7.45	14	1	—	—	12.58	15.03	0.10

2.3 优化方法和途径

(1) 数值计算

概念分析 CFG 群桩对土的加固作用不能小视,但又不知如何考虑,考虑多少,因此,设计团队籍数值分析希望体现群桩对土的加固作用。

a) 模型

为简化计算,选取最深台仓边坡剖面,简化为平面应面问题,采用 Flac<sup>3D</sup> 对基坑开挖过程进行数值模拟<sup>[7]</sup>。土体采用 solid 单元,桩采用 pile 单元。pile 单元集合了梁单元和锚杆单元的力学特性,可以模拟桩体弯曲、剪切和拉压等力学行为。采用弹簧耦合模型,pile 单元还可以模拟桩土之间滑移错动、张合和闭合等变形特性。模型考虑了台仓周边 CFG 桩和台仓底部钢筋混凝土灌注桩,如图 8 所示,并去掉锚索,按照预定锚索位置分步开挖。

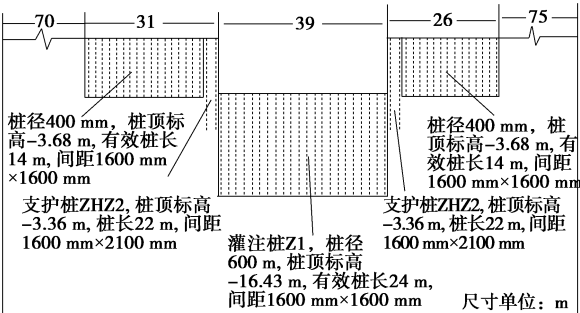


图 8 台仓侧面和底部桩基示意图

Fig. 8 Sketch of pile foundation at side and bottom of stage-bin

地层土体和冠梁均采用 Mohr 本构模型,即摩尔库仑模型计算。喷层面板采用 shell 壳单元模拟,线弹性本构模型。钻孔灌注桩、CFG 桩、支护桩结构均采用 pile 结构桩单元模拟,线弹性本构模型。简化模型如图 9 所示。

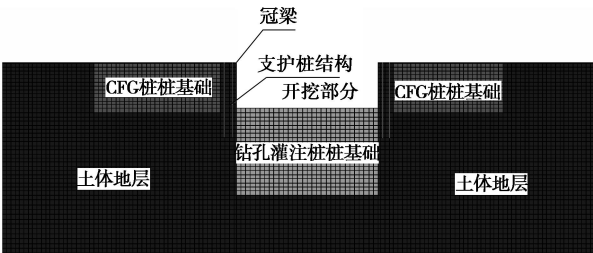


图 9 数值模型

Fig. 9 Numerical model

b) 初始地应力

基坑工程埋深较浅,一般不考虑构造地应力的影响。初始地应力只考虑土体自重应力场,采用人工添加水平应力进行模拟,水平应力数值约等于竖向应力的一半。基坑变形分析假定不受地下水位的影响,计算土体取饱和重度。

c) 物理力学参数

根据岩土工程勘察报告,选取计算用土体物理力学参数,如表 1。勘察报告没有提供变形模量、泊松比值。根据文献<sup>[8]</sup> $E_0 = \lambda E_s$ ,本文  $\lambda = 3$ ,泊松比值按<sup>[9]</sup>取值。其它力学参数如表 3~5。

表 3 喷射混凝土面板物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of concrete panels

面板类型	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量 /GPa	泊松比	厚度 /mm
一般	2500	26	0.3	80

表 4 冠梁力学参数

Table 4 Mechanical parameters of top beams

土类型	层厚 /m	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	黏聚力 /MPa	摩擦角 /(°)	饱和重度 /(kg·m <sup>-3</sup> )
冠梁	0.4	20.55	23.33	45.7	22.9	25

表 5 支护桩设计参数

Table 5 Design parameters of retaining piles

桩编号	桩体类型	长度 /m	水平间距/mm	钻孔直径/mm	混凝土等级
P1	支护桩	220	2100	600	C30
P2	支护桩	140	2400	600	C30
P3	支护桩	180	2400	600	C30
P4	CFG 桩	140	1600	400	C25
P5	钻孔灌注桩	240	1600	600	C35

d) 边界条件

假定沿基坑周边走向无限长,按平面应变计算。模型左右边界、前后边界施工法向约束,底边界施加固定约束。

e) 计算结果

台仓按照预先布置锚索的工况垂直开挖,整个坡面变形是上大下小,最大变形发现在坑顶。随基坑开挖深度台仓支护结构水平变形越来越大。坑顶向基坑

内部变形最终达到 38.117 mm，如图 10 所示，CFG、支护桩和坑底桩的弯矩如图 11，12 所示。

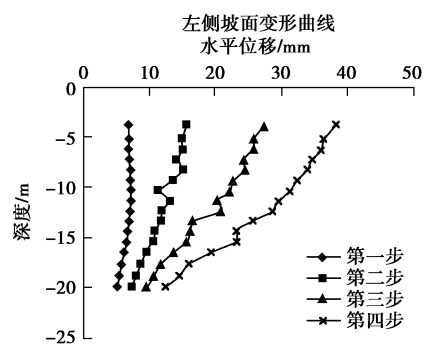


图 10 左侧坡面变形曲线图  
Fig. 10 Deformation curves of left slope

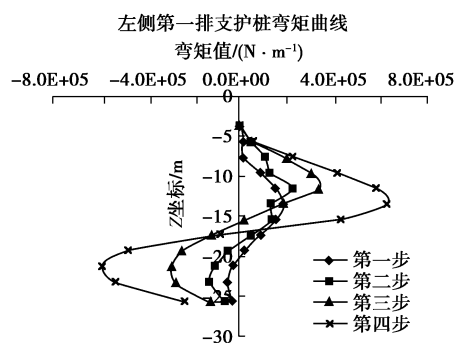


图 11 左侧第一排支护桩弯矩曲线图  
Fig. 11 Moment curves of left supporting pile in first row

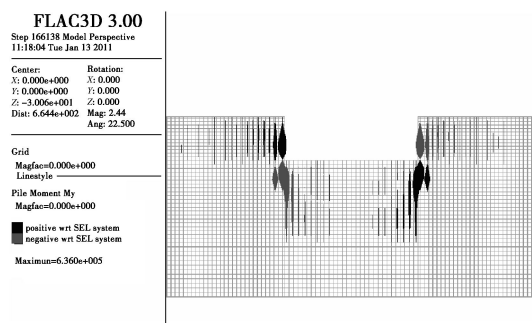


图 12 台仓开挖结束 CFG、支护桩和坑底桩的弯矩云图  
Fig. 12 Moment nephogram of CFG pile, supporting pile and bottom pile after excavation of stage-bin

由于时间紧迫，数值计算模型有诸多不足，比如土体弹性模量取值，支护桩配筋、冠梁布置、空间作用等均未考虑，降水效果也未计入，各层土体取饱和重度，但整体变形曲线和最大顶部水平位移结果显示 CFG 群桩发挥了加固作用，最大顶部位移约 0.3%，且呈现悬臂式变形态势。

对比分析图 5 和图 10，考虑此 CFG 桩的侧向加固作用，最大水平位移减少了 4 倍。

(2) 跟踪勘察

基坑降水后相关土层参数可提高 20%~30%<sup>[7]</sup>,

如表 6，开挖过程中选取代表性土层进行了跟踪实验，结果验证了上述结论。

表 6 相关土层参数比较

Table 6 Comparison of related soil parameters						
土层	降水前 (标准值)		降水后 (标准值)		提高/%	
	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^{\circ})$	$c/\text{kPa}$	$\Phi/(^{\circ})$	$c/\text{kPa}$	$\Phi/(^{\circ})$
③	19.2	18.8	26.34	26.88	37	43
④	19.9	17.6	26.91	26.13	35	48
⑤	22.7	19.9	30.71	27.06	35	36

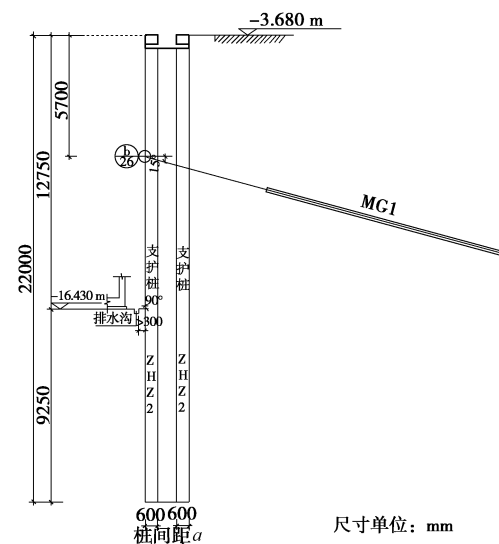


图 13 1-1 支护单元优化剖面  
Fig. 13 Optimized profile of 1-1 retaining unite

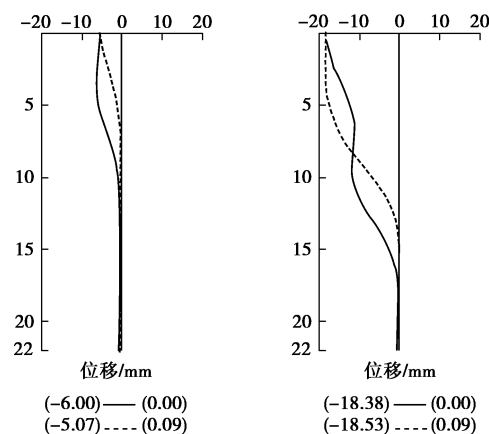


图 14 1-1 支护单元优化后-10 m 开挖 (左) 和开挖结束 (右) 位移曲线

Fig. 14 Displacement curves of 1-1 optimized unit of 1-1 under excavation of -10 m(left) and completion (right) of excavation

(3) 设计优化

考虑数值计算 CFG 地基显示的侧向加固作用，结合大剧院台仓周边开挖降水，实际受周边配套工程降水影响，地下水位已在-10 m 以下，计算参数  $c$ ， $\varphi$  在 -10 m 以上按 30%提高，仅保留-9.38 m 处预应力锚索，优化后 1-1 剖面做法和计算结果分别如图 13，14

所示。表明开挖至基底最大水平位移 18.53 mm (图 14 右), 是开挖深度的 0.145%, 满足主体结构对复合地基水平变形的要求。

### 3 实施效果

#### 3.1 系统监测, 反馈设计, 指导施工

基于工程的重要性、设计优化的可行性以及国内基坑理论的滞后, 台仓设计要求施工过程中进行系统监测, 如图 4 所示。依据监测数据反馈, 指导施工, 预测下步施工支护结构和周边环境的变化。

#### 3.2 实施效果

基坑开挖结束后, A 点(图 4)对应的桩体倾斜曲线, 如图 15 所示, 最大水平位移为 3.35 mm, 位于桩顶下 6.5 m 处。实际上论证优化方案时, 台仓已挖至 -10 m, 当时桩体最大水平位移为 1.45 mm, 位于桩顶下 6.0 m。远小于数值模拟完成第 2 步工况(图 10)位移 16.37 mm, 以及优化后开挖至 -10 m 的水平位移 6 mm(图 14(a))。正因此, 才顺利的优化掉 1-1 剖面 -6.18 m 处锚索, 并在完成 1-1、2-2 支护单元 -9.38 m 处锚索后, 为减掉 3 个剖面 -12.38 处锚索树立了信心。

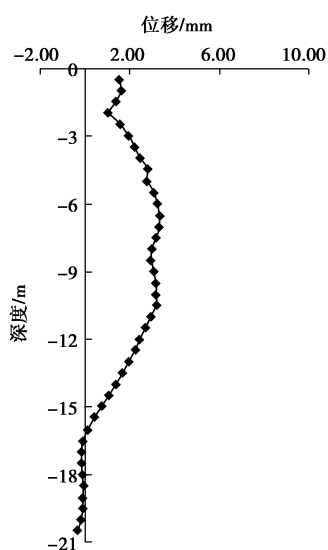


图 15 台仓侧壁外排支护桩倾斜曲线

Fig. 15 Inclined curve of outer retaining pile at side of stage-bin

### 4 结论和思考

#### 4.1 结论

(1) CFG 复合地基竖向加固作用已得到深入研究和广泛运用, 但在国内外相关领域未见 CFG 复合地基的侧向变形和侧压力研究成果。现行国家和行业相关规范、规程缺乏对开挖条件下 CFG 复合地基侧向基坑支护结构设计的规定和指导。

(2) 群桩复合地基或群桩基础对土体的侧向加固作用存在且不可小视。基于复合地基竖向加固机理, 判断 CFG 复合地基侧向加固作用有利于优化基坑支护结构刚度和工作量, 采用数值模拟手段, 考虑侧向 CFG 复基桩和坑底灌注桩对土体的侧向加强, 分析结果与原状土计算情况比较, 证明了群桩对土体的侧向加固作用存在且不可小视。

(3) 台仓支护结构优化成功是综合利用全部有利因素的结果。依据跟踪勘察, 获得降水后典型土层提高的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  值, 不仅证明相关文献的经验, 而且依靠参数提高 30% 完成了最终的设计优化。使用 30% 的参数提高, 不是完全依靠基坑降水对于土层参数的改善, 而是综合考量了侧向 CFG 桩及坑底灌注桩对土的加固作用、台仓侧壁的空间作用和降水作用等全部有利因素。

(4) 基坑动态监测是验证设计、指导施工的重要措施。正是依靠动态监测的时时反馈, 不断验证相同开挖工况下实际变形较大幅度的低于计算分析, 从而持续坚定优化的决心和信心。

(5) “一桩两用”是基坑工程可持续发展的重要方向。台仓支护桩既是基坑支护结构, 也是大剧院复合地基的组成部分, 实现了“两桩合一”和“一桩两用”, 不仅节省了支护结构的临时投资, 降低了造价, 加快了工期, 而且体现与树立了基坑支护技术的可持续和绿色方向。

#### 4.2 思考

(1) 随城市建设发展, CFG 复合地基或桩基已是现在建筑的常用地基基础形式, 与大剧院台仓环境条件(图 8)类似的基坑工程是新建项目的重要特征。完成类似基坑支护结构的设计, 不仅要确知群桩存在对于土体的侧向加固作用, 而且还应明确如何估计、如何分析。鉴于目前国内相关规范还未涉及, 大多采用原状土代替群桩复合(土)体进行设计, 由上文优化过程可知, 可能造成了一定浪费, 因此, 值得同行重视和关注。

(2) 大剧院台仓周围复合地基区别于新建项目基坑临近群桩基础(包括复合地基)的情况, 因为台仓周边复合地基需要等待台仓主体结构完工后才发挥作用, 而新建项目基坑临近的群桩基础高层建筑, 群桩基础正在承担既有建筑荷载, 邻近基坑桩基控制水平变形远不是 0.15% 那么简单, 邻近基坑桩基位移控制标准值得研究。

#### 参考文献:

- [1] 李连祥, 朱金德, 于 峰. 济南市深基坑工程现状调查报告及发展建议[J]. 西部探矿工程, 2006(11): 1 - 2. (LI

- Lian-xiang, ZHU Jin-de, YU Feng, Current investigation report and development suggestion of deep foundation pit in Jinan[J]. West-China Exploration Engineering, 2006(11): 1 - 2. (in Chinese))
- [2] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))
- [3] JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (JGJ 120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
- [4] 黄 强. 深基坑支护设计技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1997. (HUANG Qiang. The design technology about deep foundation pit supporting[M]. Beijing: China Building Materials Press, 1997. (in Chinese))
- [5] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (GONG Xiao-nan. Composite foundation design and construction guide[M]. Beijing: People Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [6] 余志成, 施文华. 深基坑支护设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (YU Zhi-cheng, SHI Wen-hua. Design and construction of deep foundation pit[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))
- [7] 刘 波, 韩彦辉(美国). FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005. (LIU Bo, HAN Yan-hui(America). Principle, application examples and guide of FLAC[M]. Beijing: People Communications Press, 2005. (in Chinese))
- [8] 陈仲颐, 叶书麟. 基础工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996. (CHEN Zhong-yi, YE Shu-lin. Foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1996. (in Chinese))
- [9] 常士骅, 张苏民. 工程地质手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (CHANG Shi-biao, ZHANG Su-min. Engineering geology manual[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)